# 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素

郭小娇1),龚晓萍3),石建省1),郭娇1),袁道先2),林玉石2)

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄,050061;

2) 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部,广西岩溶动力学实验室,广西桂林,541004;

3) 广东省惠州市惠阳区自然资源局,广东惠阳,516200

内容提要:蒸散发过程是联系大气过程和陆面水文过程的关键环节,对区域/流域水循环过程和水量平衡具有 重要影响。岩溶区,地表生态环境脆弱,对气候变化响应敏感,蒸散发可能是联系大气、水、热交换和碳循环的关键 生态水文过程。准确地估算蒸散发对于深入研究岩溶水循环响应气候变化、碳循环、生态修复等具有重要作用。 本文选择典型岩溶区桂林市为研究对象,基于 1951~2015 年桂林市气象站逐日气象数据,采用 Penman-Monterith 方法计算了潜在蒸散发量,利用 Mann-Kendall 非参数检验法和相关性分析研究桂林市潜在蒸散发的变化趋势及 其影响因素。研究结果表明,桂林市潜在蒸散发具有明显的年、年际和季节尺度变化特征。1951~2015 年桂林市 潜在蒸散发呈显著的减小趋势,变化速率为-8.02 mm/10a;夏季、秋季和冬季潜在蒸散发呈下降趋势,而春季呈微 弱的上升趋势;夏季潜在蒸散发的显著减小是影响年蒸散发下降的主要原因;桂林市潜在蒸散发在 1967 和 2003 年左右发生突变;通过 Mann-Kendall 趋势检验和相关性分析得出,桂林市平均气温、最高、最低气温呈显著的上升 趋势,而风速、相对湿度、日照时数呈显著的下降趋势;日照时数是影响桂林市潜在蒸散发变化的主要因素,其次是 风速。

关键词:潜在蒸散发;Penman-Monteith;变化趋势;日照时数;气候变化

蒸散发是陆面水循环的重要组成部分,是联系 水、热和碳循环的关键环节(Jung et al., 2010),对 区域水量平衡具有重要作用。蒸散发是一种从液态 水转化为汽态水的过程,由地表和周围环境的水汽 压差而决定(Kim et al., 2015)。严格意义上,蒸散 发表示水分从陆面转化成水蒸汽进入大气的所有过 程总和,包括水面蒸发、陆面蒸发和植被蒸腾(Wang Kaicun et al., 2012; Li Changxiu, 2013)。然而, 蒸散发受到气象条件、土壤水分(Jung et al., 2010)、植被、大气  $CO_2$ 等因素的综合影响 (Schlesinger et al., 2014; Pan Shufen et al., 2015),是一个复杂的相互作用过程(Liu Qiang et al., 2010)。更重要的是,气候变暖加快了全球水 循环(Huntington, 2006),导致蒸散发发生了显著 变化(Jung et al., 2010; Fan Junliang et al., 2016)。同时,由于全球陆地表面 60%的降雨将以 蒸散发形式返回大气(De Dois et al., 2015),且其 会消耗一半以上的可吸收太阳辐射。因此,蒸散发 被认为是水循环过程中最重要的环节(De Dois et al., 2015; Pan Shufen et al., 2015)。为了更好的 理解水循环变化,需定量全球或区域水量平衡中的 主要组成部分,关键是如何准确地估算蒸散发量 (Kingston et al., 2009)。近年来,蒸散发对气候变 化的响应与反馈已成为研究气候变化对陆地水循环 和水资源影响的热点和难点内容。研究蒸散发变化 不仅对全球水循环有重要作用(Pan Shufen et al., 2015; Gao Xiaoli et al., 2016),而且对生态过程与 碳循环(Kingston et al., 2009; Jasechko et al., 2013)、农业灌溉管理(Jhajharia et al., 2015)、农作 物产量(Chattopadhyay et al., 1997; Gao Xiaoli et

作者简介:郭小娇,女,1988年生。博士,主要从事水文地质、气候变化与水循环等研究。Email: lguo2010@163.com。通讯作者:石建省, 男,1962年生。博士,研究员。主要从事水文地质环境地质、中国黄土、脆弱带地质生态学等研究。Email: tiger7886@263.net。

引用本文:郭小娇,龚晓萍,石建省,郭娇,袁道先,林玉石. 2019. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素. 地质学报,93(12):3269~3281, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020010.
Guo Xiaojiao, Gong Xiaoping, Shi Jiansheng, Guo Jiao, Yuan Daoxian, Lin Yushi. 2019. The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for a typical karst area. Acta Geologica Sinica, 93(12):3269~3281.

注:本文为中国地质科学院基本科研业务费项目(SK201703,SK201903)资助的成果。

收稿日期:2019-06-01;改回日期:2019-07-23;网络发表日期:2019-10-24;责任编辑:黄敏。

al., 2016)等具有重要意义。

全球气候变暖毋庸置疑(Piao Shilong et al., 2010),正如人们所期望的,全球变暖会引起气温上 升,地表变得干燥,因此会导致地表蒸散发量增加 (Jung et al., 2010; Yin Yunhe et al., 2010b)。然 而,很多研究报道了实测蒸发皿蒸发量或潜在蒸发 量在很多地区是降低的(Peterson et al., 1995; Roderick et al., 2002; Fu Guobin et al., 2009; McVicar et al., 2012; Wang Kaicun et al., 2012; Wang Zhaoli et al., 2017; Breña-Naranjo et al., 2017),例如美国(Irmak et al., 2012)、前苏联 (Peterson et al., 1995)、澳大利亚(Roderick et al., 2004)、新西兰(Roderick et al., 2005)、印度东 北部(Chattopadhyay et al., 1997; Marshall et al., 2012)、加拿大北部(Burn et al., 2007)、泰国 (Tebakari et al., 2005)、墨西哥(Breña-Naranjo et al., 2017)和中国(Yin Yunhe et al., 2010a, 2010b; Liu Changming et al., 2012; You Guangyong et al., 2013; Wang Zhaoli et al., 2017),尤其是北半球在过去 50 年以 2~4 mm a<sup>-2</sup> 的蒸散发速率在稳步减小(Roderick et al., 2002, 2005),出现了"蒸发悖论"现象,引起了人们的广泛 关注(Brutsaert et al., 1998; Roderick et al., 2002; Cong Zhentao et al., 2008; Fu Guobin et al., 2009; Wang Zhaoli et al., 2017)。然而,有些 研究表明在伊朗西部(Nouri et al., 2019)、土耳其 (Dadaser-Celik et al., 2016)、以色列(Tabari et al., 2011)、非洲西部(Onyutha, 2016)蒸发量呈增 长趋势,在中国的东北北部(Wen Shanshan et al., 2014)、中部地区、华北平原地区(Mo Xingguo et al., 2017)、部分南方地区蒸散发也呈增长趋势 (Yin Yunhe et al., 2010a; Wang Zhaoli et al., 2017)。但究其原因,对影响蒸散发时空变化的因素 仍没有统一的说法(McVicar et al., 2012)。各国 学者开始重视全球及区域尺度上蒸散发的变化趋势 及其对气象因素的敏感性研究(Fan Zexin et al., 2018)。近年来,在中国已有不少报道研究了中国区 域或流域尺度的潜在蒸散发时空变化及影响因素 (Yin Yunhe et al., 2010a; Liu Changming et al., 2011; Wang Zhaoli et al., 2017),但主要集中在长 江(Wang Yougan et al., 2007; Xu Yu et al., 2017)、黄河(Liao Xiaofang et al., 2010; Liu Qiang et al., 2010; Zhang Kexin et al., 2015)、珠江(Li Cangxiu et al., 2014)、泾河(Wang Pei et al., 2012)、渭河(Zuo Depeng et al., 2012)、黑河(Du Chaoyang et al., 2016; Luo Kaisheng et al., 2017)、辽河(Wang Bingliang et al., 2014; Gao Zhendong et al., 2017)、松花江(Wen Shanshan et al., 2014)、西北地区(Huo Zailin et al., 2013)、黄 土高原(Zhao Yifei et al., 2014)和青藏高原(Wang Liuzhu et al., 2014)等地,而对西南岩溶区的蒸散 发变化趋势及影响因素研究仍相对较少。西南岩溶 区的地形地貌复杂、土壤贫瘠、生态环境脆弱,旱涝 灾害严重,对气候变化敏感(Jiang Zhongcheng et al., 2014)。同时地表水资源短缺,地下水资源丰 富(Cao Jianhua et al., 2017),独特的地表地下"双 层"介质结构控制着岩溶水循环。一方面,地表植被 利用表层岩溶带水分维系地表生态环境及驱动岩溶 碳循环;另一方面,通过蒸散发形式积极参与表层岩 溶带水循环过程。因此,岩溶区蒸散发可能会成为 耦合气候、生态、水文相互作用的关键因素和重要环 节,准确估算区域蒸散发量对生态环境修复、水资源 管理、表层岩溶带调蓄机制研究具有重要的作用。

本文以典型岩溶区桂林市为研究对象,基于 1951~2015 年桂林市日气象数据,利用 Penman-Monteith 方法计算了桂林市日潜在蒸散发量,分析 其年、年际、季节尺度的变化特征;通过 Mann-Kendall 趋势检验和相关性分析,研究桂林市潜在 蒸散发和气象因子的变化趋势及相关性,确定控制 潜在蒸散发变化的影响因素。

## 1 研究区概况

桂林市地处广西东北部(25°15′23.3″N,110°19 25.5"E,平均高程 150 m)(图 1),湘桂走廊南端,具 有典型的岩溶地貌形态,素有"桂林山水甲天下"的 美称而闻名于世界。桂林市属于亚热带季风气候 区,四季分明,雨量充沛但年内分配不均。降雨主要 受到季风气候影响,夏秋季受西南(或印度)季风和 东南季风的共同影响,而冬季和春季主要受冬季风 冷气团的影响。根据 1951~2015 年气象观测资料, 多年平均气温为19.2℃,最高气温出现在6~9月, 最低气温出现在1~2月。多年平均降雨量为1903 mm,4~8月为雨季,其降雨量占年降雨量的70%。 9月至次年3月为旱季,仅为年降雨量的30%。最 大月降雨量出现在 6 月为 359 mm,最小月降雨量 在10月为50mm。年平均相对湿度为76%~ 82%。秋冬季少雨,较为干燥,冬季气温较低,时有 霜冻。





## 2 研究方法

#### 2.1 潜在蒸散发估算方法

联合国粮农组织(FAO)将参考蒸散发定义为 从假设作物高度为 0.12 m,并有固定的表面阻力为 70 s/m,反照率为 0.23 的参考冠层的蒸散发(Allen et al., 1998)。本文采用的是 1988 年 FAO 推荐的 修正 Penman-Monteith 模型来计算桂林市潜在蒸 散发量 ET<sub>0</sub>,计算公式如下:

$$ET_{0} = \frac{0.408\Delta(R_{n} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_{2}(e_{s} - e_{a})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_{2})}$$
(1)

*ET*<sub>0</sub>为参考作物蒸散量,mm/d;Δ 为饱和水汽 压-温度曲线斜率,kPa/℃; $R_n$ 为地表净辐射量,MJ •m<sup>-2</sup>•d<sup>-1</sup>,即净短波辐射  $R_{ns}$ 和净长波辐射  $R_{nl}$ 之 差;G为土壤热通量,MJ•m<sup>-2</sup>•d<sup>-1</sup>;T为2m高 度处的平均气温,℃;γ为干湿表常数,kPa/℃; $u_2$ 为 2m处风速; $e_s$ 和 $e_a$ 分别为饱和水汽压和实际水汽 压,kPa。以上各项参数可由气象要素计算得到,具 体计算方法参见 Allen et al. (1998)。 其中,相对于净辐射  $R_n$ 来说,土壤热通量 G 是 个很小的量,特别是当地表被植被覆盖、计算时间尺 度是 10d 或更短时,G 可以忽略不计,即  $G \approx 0$ 。对 于地表净辐射量  $R_n$ ,采用 Allen 等(1998)提出的计 算方法:

$$R_{\rm n} = (1-\alpha)R_{\rm ns} - R_{\rm nl} \tag{2}$$

式中, $\alpha$ 为反照率,对于假设的参考作物  $\alpha$  取 0.23; $R_{ns}$ 为短波辐射,MJ • m<sup>-2</sup> • d<sup>-1</sup>; $R_{nl}$ 为净长波 辐射,MJ • m<sup>-2</sup> • d<sup>-1</sup>。净长波辐射计算公式如下:

$$R_{\rm nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\rm max}^{4} + T_{\rm min}^{4}}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35 \right)$$
(3)

式中, $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 分别为最高、最低温度,K; $e_a$ 为 实际水汽压,kPa; $\sigma$ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数,其值 为 4.903×10<sup>-9</sup> (MJ · K<sup>-4</sup> · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>); $R_s/R_{s0}$ 为 相对短波辐射,其中 $R_s$ 为短波辐射, $R_{s0}$ 为晴空太阳 短波辐射。而净短波辐射计算公式为:

$$R_{\rm ns} = (1-\alpha) \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \frac{24(60)}{\pi} G_s \cdot$$

 $d_r \big[ \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \big]$ (4)

式(4)中, $a_s$ 和 $b_s$ 为地球外辐射的透过系数;n和N分别表示日照时数和最大可能日照时数; $G_{sc}$ 为太阳常数; $d_r$ 为日地相对距离; $\omega_s$ 为日落时角; $\varphi$ 为纬度; $\delta$ 为太阳倾角。

计算潜在蒸散发的数据主要是桂林市气象站 1951~2015年的逐日气象资料,包括平均气温、最 高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数、 平均水汽压,数据来源于中国气象局气象数据网 (http://data.cma.cn/)。其中,桂林市气象站位于 距离桂林市区约5 km的东北部,由国家气象局建 立,气象站点信息和气象参数特征见表1。所有气 象资料经过了气候界限值检查、台站极值检查和内 部一致性检查等进行质量检验和控制。根据桂林市 气候特点,将桂林市的季节划分为春季为2~4月, 夏季5~7月,秋季8~10月,冬季11~1月。

表 1 广西桂林市气象站点信息及气象参数特征

Table 1	Characteristics of	Guilin meterological	station and meterological	l parameters in Guangxi Province
---------	--------------------	----------------------	---------------------------	----------------------------------

站点	经度	纬度	高程 (m)	左亚拉欧五昌					
				中十均陣雨重 (mm)	多年平均值	多年平均	多年平均	相对湿度(%)	
						最高气温	最低气温		
桂林	$110^{\circ}18'$	25°19′	164.4	1903	19.2	23.4	16.0	75	

#### 2.2 Mann-Kendall 趋势检验法

在长时间序列的趋势与突变分析中, Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织(WMO)推荐 并广泛使用的非参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出,在分析降雨、气温、径流和水质等要 素时间序列的趋势变化方面得到了广泛发展。 Mann-Kendall 检验法不需要样本遵从一定的分布, 其结果也不受少数异常值的干扰,能很好揭示整体 时间序列的突变情况与趋势变化(Chen Zhongping et al., 2016)。

在 Mann-Kendall 检验中,假设  $H_0$  为时间序列 数据( $x_1$ ,..., $x_n$ ),是 n 个独立的、随机变量,且保 持相同连续分布。假设  $H_1$ 是双边检验,对于所有 的  $k, j \leq n, \exists k \neq j, x_k \exists x_j$ 的分布不相同,检验的 统计变量 S 计算公式如下(Cao Jieping et al., 2008):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} Sgn(x_j - x_k)$$
(5)

其中, Sgn(
$$x_j - x_k$$
) =  $\begin{cases} +1, (x_j - x_k) > 0\\ 0, (x_j - x_k) = 0\\ -1, (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$ 

S为正态分布,其均值为 0,方差为 Var(S) = n (n-1)(2n+5)/18。当 n>10 时,标准的正态统计 变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0\\ 0 & , S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases}$$
(6)

先给定置信水平  $\alpha$ ,如果  $|Z| \ge Z_{1-a/2}$ ,即在置 信水平上,说明时间序列存在一定程度上的上升或 下降趋势。对于统计变量 Z,大于 0 时呈上升趋势; 小于 0 时,则呈下降趋势。显著性检验的置信度为 90%,95%和 99%时,|Z|分别大于等于 1.28,1.64 和 2.32(Chen Zhongping et al., 2016)。

Mann-Kendall 检验在序列突变检验时,对于 n 个样本量 $x_i$ ( $i=1, 2, \ldots, n$ ),构成一秩序列:

定义统计变量:

 $UF_{k} = \frac{\left[S_{k} - E(S_{k})\right]}{\sqrt{Var(S_{k})}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \tag{8}$ 

式中: $E(S_k) = k(k+1)/4$ ;  $Var(S_k) = k(k-1)$ (2k+5)/72

UF<sub>k</sub>为标准正态分布,给定显著性水平 α,若 |UF<sub>i</sub>|>U<sub>a/2</sub>,则表明序列存在明显的趋势变化。 将时间序列 x 按逆序排列,再按照上式计算,同 时使

$$\begin{cases} UB_{k} = -UF_{k} \\ k = n+1-k \end{cases} (k=1, 2, \dots, n)$$
(9)

通过分析统计序列 UF<sub>k</sub>和 UB<sub>k</sub>可以进一步分 析序列 x 的趋势变化,而且可以确定突变时间,指出 突变的区域。若 UF<sub>k</sub>值大于 0,则表明序列呈上升 趋势;若小于 0 则表明呈下降趋势;当超过临界直线 时,表明上升或下降趋势显著。若 UF<sub>k</sub>和 UB<sub>k</sub>这 2 条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点 对应的时间即为突变开始的时间(Cao Jieping et al., 2008; Chen Zhongping et al., 2016)。

## 3 结果

#### 3.1 不同时间尺度潜在蒸散发变化

根据桂林市气象站 1951~2015 年气象资料,计 算了桂林市潜在蒸散发量,分析其年、年际、季节尺 度的变化特征(图 2)。1951~2015年桂林市多年平 均潜在蒸散发量 ET。为 1137.9 mm,变化范围为 1010.4~1269.5 mm,最高值出现在 1956 年,最小 值在 2002 年。其中,秋季蒸散发量最高为 378.0 mm/a,夏季次之(369.2 mm/a),春季为205.7 mm/ a,冬季最少为184.8 mm/a,分别占全年蒸散量的 33.2%、32.4%、18.1%、16.2%(表 2)。夏秋两季 潜在蒸散发占全年的 65.6%,对全年蒸散发贡献最 大。从年尺度上,1951~2015年桂林市潜在蒸散发呈 明显的下降趋势,下降速率为-8.02 mm/10a(图 2)。 图 3 为桂林市潜在蒸散发的季节变化,从图可知桂林 市夏、秋、冬季潜在蒸散发呈下降趋势,下降速率分别 为-4.231 mm/10a、-2.871 mm/10a、-1.138 mm/10a;而春季呈微弱的上升趋势,上升速率为 0.134 mm/10a(图 3),这可能与春季气温的显著上升有关, 尤其是春季最低气温的上升较大,从而导致潜在蒸散 发呈上升趋势。Wang Zhaoli et al. (2017)对中国区 域参考蒸散发时空变化研究时指出中国西南地区夏 季、秋季、冬季表现出减小趋势,其中夏季的减小趋势 达到 0.05 显著性水平,与本研究的结果一致。

### 表 2 广西桂林市年、季节潜在蒸散发 ET。 平均值、最大、最小值

Table 2 Mean, maximum and minimum values of annual

and seasonal ET<sub>0</sub> in Guilin, Guangxi Province

		-		-	
	年 ET <sub>0</sub>	春季 ET <sub>0</sub>	夏季 ET <sub>0</sub>	秋季 ET <sub>0</sub>	冬季 ET <sub>0</sub>
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
平均值	1137.9	205.7	369.2	378.0	184.8
最大值	1269.5	243.1	424.7	444.2	225.6
最小值	1010.4	178.5	325.5	320.3	133.7
所占比例(%)	_	18.1	32.4	33.2	16.2



Fig. 2 The annual and inter-annual variations of potential evapotranspiration for the period of 1951~2015 in Guilin, Guangxi Province

表 3 为年代际尺度上的年均和季节的 ET。变化 结果。从年代际尺度上,桂林市潜在蒸散发 ET。表 现出"增-减-增"的波动变化特征,其中 60 年代呈增 加趋势,1970s 至 1980s 呈明显的减小趋势;而 90 年 代以来蒸散发明显增加(图 2),1990s 和 2000s 潜在 蒸散发的变化幅度分别为 0.8%,0.9%。从年代的 季节尺度上看,春季和秋季 1960s 至 1980s 呈减小 趋势,1990s 至 2000s 年代呈增长趋势。1990 年代 春、秋和冬季增加幅度最大,而夏季呈减小趋势,变 化幅度为一4.5%。2000s年代除冬季减小外,其他 季节均呈上升趋势,变化幅度分别为1.9%、2.3%、 1.9%。因此,2000s年代蒸散发呈明显的增长趋 势。就夏冬两季来讲,年代间的蒸散发变化有增有 减,整体上多年变化呈下降趋势。夏季,1970s和 1990s年代减小幅度较大,而冬季1960s和2000s年 代减小幅度最大(表 3)。从平均变化幅度上看,春 季有微弱的增长趋势,而夏、秋和冬季变化幅度均呈 负值。就年平均蒸散发 ET。而言,整体上呈减小趋 势,变化幅度为一0.5%,较上一年代表现为下降趋 势的是 1970s 和 1980s, 尤其是 70 年代的变化幅度 最大为一3.1%。综上所述,年均ET。的下降主要是 由夏季和冬季 ET。的下降贡献的。

潜在蒸散发受多个气象因子的综合影响,具有 明显的年内分配特征。1951~2015年月平均蒸散 发量为51.2~146.3 mm。从月变化尺度上,桂林



Fig. 3 Seasonal variations of potential evapotranspiration in Guilin, Guangxi Province

表 3 广西桂林市年及季节潜在蒸散发 ET。的年代际变化

Table 3 Interdecadal variations of the annual and seasonal potential evapotranspiration in Guilin, Guangxi Province

在伊	年均 ET <sub>0</sub>	变幅	春季 ET <sub>0</sub>	变幅	夏季 ET <sub>0</sub>	变幅	秋季 ET <sub>0</sub>	变幅	冬季 ET <sub>0</sub>	变幅
平代	(mm)	(%)								
1950s	1164.17	_	208.57	_	375.74	—	390.75	_	189.5	_
1960s	1167.32	0.3	207.49	-0.5	386.8	2.9	390.08	-0.2	183.32	-3.3
1970s	1130.66	-3.1	201.95	-2.7	367.04	-5.1	375	-3.9	185.46	1.2
1980s	1117.85	-1.1	201.44	-0.3	371.35	1.2	361.37	-3.6	182.7	-1.5
1990s	1126.85	0.8	205.62	2.1	354.46	-4.5	375.46	3.9	191.49	4.8
2000s	1136.89	0.9	209.48	1.9	362.59	2.3	382.44	1.9	182.99	-4.4
Mean	1140.6	-0.5	205.8	0.1	369.7	-0.6	379.2	-0.4	185.9	-0.6

市 ET。年内分布呈先增大后减小的单峰型分布(图 4), ET。主要集中在 5~10 月, 最高值出现在 7 月, 而1月份ET。最低。3~7月气温逐渐回升、降雨量 增多,ET。同步升高;7、8月气温最高,也是降雨相 对较多的时期,光照和水分条件充足,植被生长茂 盛,蒸腾蒸发旺盛,因此在7月ET。达到最大值 (146.3 mm)。10~12 月气温迅速降低,降水量偏 少,植被处于非生长季节。由于气温、能量降低和植 被气孔导度减小,该时期 ET。迅速降低。从图 4 可 以看出,ET。和气温均在7月达到最大值,而降雨量 最高值出现在 6 月,表现出 ET。和最高降雨量不同 步现象,具有滞后性,这可能是由于雨季降雨充沛, 地表土壤和含水层水分充足,水分条件不是限制 ET。变化的主要因素。ET。和气温的最小值出现在 1月,而降雨量在12月。桂林地区1月份降雨逐渐 增多,虽然水分条件有所改善,但气温仍较低,亦不 会增加蒸发量。因此,蒸散发量的年内变化是受水 分条件、气温、日照时数等多种因素共同作用的结 果,这与相关研究结论一致(Dong Qingqing et al., 2016; Jia Qiuhong et al., 2016).



蒸散发及降雨、气温月变化

Fig. 4 Monthly changes of potential evapotranspiration and precipitation, air temperature from 1951 to 2015 in Guilin, Guangxi Province

### 3.2 潜在蒸散发的趋势变化和突变性检验

利用 Mann-Kendall 检验法对桂林市 1951~2015年的年、季节蒸散发进行趋势和突变性分析(图 5,图 6)。从图 5可以看出,UF 统计曲线在1954~1969年位于零界线以上,说明在该时段内蒸散发总体呈上升趋势,但 1970年后 UF 统计值小于 0,表明 1970年后蒸散发呈下降趋势,且在1984~1991、1993~1995、1997、2001~2003年蒸散发下降趋势达到 0.05显著性水平,而在 2003年后下降趋势减缓,但没有达到显著水平。桂林市蒸散发变化的突变年份发生在 1967年和 2003年左右。



图 5 广西桂林市年潜在蒸散发 Mann-Kendall 突变检验图 Fig. 5 Aunnual Mann-Kendall mutation test of ET<sub>0</sub> for Guilin city, Guangxi Province

图 6 为桂林市潜在蒸散发季节性 Mann-Kendall 突变检验图。从图 6a 可以看出春季蒸散发 量在 1951~1970 年间,除了 1953 年 UF 值为一 0.52 外,其他值均位于零界线以上,表明该时段内 蒸散发呈上升趋势。除 1974 年外,1971~2008 年 UF 统计值小于 0,说明该时段内蒸散发呈下降趋 势,但由于 UF 曲线没有超出 0.05 显著性水平线, 所以蒸散发变化趋势不显著。2008 年后,UF 统计



图 6 广西桂林市潜在蒸散发季节性 Mann-Kendall 突变检验图 Fig. 6 Seasonal Mann-Kendall mutation test of ET<sub>0</sub> in Guilin, Guangxi Province

值大于 0,说明桂林市春季蒸散发量在 2008~2015 年间呈上升趋势。此外,近10年来,UF线与UB线 在 2006 年相交,春季蒸散发突变发生在 2006 年左 右。夏季潜在蒸散发量变化最为明显,突变年发生 在 1973 年和 1980 年(图 6b)。1963~1972 年间除 1970年蒸散发呈下降趋势外,其余年份呈增长趋 势。1973年后蒸散发持续下降,尤其是1993~2015 年达到显著水平。秋季蒸散发突变发生在 1969 年 左右,UF曲线在1970年前统计值为正,表明潜在 蒸散发呈上升趋势。1970年后潜在蒸散发开始持 续下降,并在1984~1991年蒸散发减小趋势达到显 著水平。UF和 UB曲线在 2003 年左右相交, 2003 年后蒸散发减小趋势减弱(图 6c)。冬季 UF 曲线不 存在显著变化趋势,在1958年左右发生突变。1958 年前蒸散发呈上升趋势,之后总体呈减小的变化趋 势。在 2007、2008 和 2011 年蒸散发出现增长趋势, 整体上 1996 年后减小趋势呈波动变化,蒸散发变化 相对比较稳定(图 6d)。

#### 3.3 潜在蒸散发变化的影响因素

潜在蒸散发变化主要受空气动力学项、辐射项和下垫面供水条件的影响(Li Cangxiu, 2013; Wen Shanshan et al., 2014),很多研究表明潜在蒸散发

变化与气象因子直接相关。本文通过分析桂林市潜 在蒸散发和气象因子的年、季节变化趋势及其之间 的相关性,研究了影响潜在蒸散发变化的主要因素。 图 7 为桂林市 1951~2015 年气象因子的年变化趋势,表 4 为桂林市潜在蒸散发和气象因子的年、季节 变化率。

据图 2 可知,桂林市 1951~2015 年潜在蒸散发 呈下降趋势,且变化率通过了  $\alpha = 0.05$  的 Mann-Kendall 显著性检验,表明潜在蒸散发呈显著减小 趋势,其变化率为-8.02 mm/10a(表 4)。从图 7 可 知,风速、相对湿度、日照时数均呈下降趋势,且均通 过了  $\alpha = 0.05$  的 Mann-Kendall 显著性检验,其气候 变化率分别为-0.074 m s<sup>-1</sup>/10a、-0.64 %/10a、 -62.90 h/10a,其中日照时数的变化对潜在蒸散发 的下降趋势影响最大。平均气温、最高最低气温均 呈上升趋势,且通过了 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显 著性检验,其气候变化率分别为 0.17 ℃/10a、0.08 ℃/10a、0.20 ℃/10a。虽然 1951~2015 年桂林市 降雨量呈增加趋势,变化率为 9.93 mm/10a,但变 化不显著。水汽压变化呈不显著减小趋势,气候变 化率为-0.02 hpa/10a(表 4,图 7)。综上所述,桂 林地区 1951~2015 年平均气温显著上升,但潜在蒸 散发量显著减小,说明桂林地区出现了"蒸发悖论" 现象。

从季节尺度上看,不同气象因子的变化趋势存 在明显差异。1951~2015年,桂林市平均气温和最 低气温四季均呈显著性上升趋势,尤其是春、冬季变 化较大;而相对湿度四季均呈显著性下降趋势,秋、冬 季变化最大。风速和日照时数呈下降趋势,其中风速 在春冬季达到显著水平;而日照时数夏、秋季达到显 著水平。降雨量在春、秋季呈减小趋势,夏、冬季呈增 加趋势,但均未达到显著性水平。水汽压秋、冬季呈 减小趋势,而春、夏季呈增长趋势。其中日照时数的 变化率较其他气象因子较大,减小趋势最为明显。

表 4 广西桂林地区蒸散发和气象因子的年、季节变化率

Table 4 Annual, seasonal changing rate of potential evaporation and climate factors in Guilin, Guangxi Province

时间	ET <sub>0</sub> (mm/10a)	降雨量 (mm/10a)	气温 (℃/10a)	风速 (m s <sup>-1</sup> /10a)	相对湿度 (%/10a)	水汽压 (hpa/10a)	日照时数 (h/10a)	最低气温 (℃/10a)	最高气温 (℃/10a)
年	-8.02*	9.93	0.17*	-0.074*	-0.64*	-0.02	-62.90*	0.20*	0.08*
春季	0.134	-14.39	0.253*	-0.114*	-0.58*	0.086	-84.45	0.279*	0. $214*$
夏季	-4.231*	28.81	0.102*	-0.023	-0.358*	0.016	-14.62*	0.097*	0.043
秋季	-2.871	-11.872	0.153*	-0.026	-0.78*	-0.065	-18.27 *	0.184*	0.046
冬季	-1.138	7.715	0.154*	-0.143*	-0.727*	-0.026*	-14.695	0.239*	0.017

注:\* 表示通过了 α=0.05 的 Mann-Kendall 显著性检验。

从蒸散发与气象因子的相关性来看,造成潜在 蒸散发增加(减小)主要是与潜在蒸散发呈正相关要 素的增加(减小)和呈负相关要素的减小(增加)引起 的。表5是潜在蒸散发与气象因子之间的相关性结 果。从表5可以看出,年尺度上,平均气温、最高气 温、风速和日照时数与潜在蒸散发呈正相关关系,其 中风速、日照时数和最高气温与潜在蒸散发的相关 性通过了0.01水平的置信检验,且日照时数的相关 系数最大,其次是风速。相反地,降雨量、相对湿度、 水汽压和最低气温与潜在蒸散发呈负相关关系,其 中降雨量、相对湿度、水汽压与潜在蒸散发在0.01 水平上显著相关。结合气象因子的年变化率分析, 日照时数和风速呈显著的减小趋势。因此,年尺度 上,日照时数和风速是影响潜在蒸散发变化的主要 因素。

从季节尺度上,平均气温、日照时数、最高气温 四季均与潜在蒸散发呈显著正相关关系,而降雨量、 相对湿度与潜在蒸散发呈显著负相关,其中相对湿 度在冬季对潜在蒸散发的负影响最大,而降雨量则 在秋季影响最大。春、夏、秋季,与潜在蒸散发相关 性最高的是日照时数,且达到 0.01 水平显著正相 关。春季,桂林市潜在蒸散发呈微弱的上升趋势,与 其呈正相关要素的增加或呈负相关要素的减小是影 响春季蒸散发量上升的主要因素。根据表 4 和表 5 可知,春季平均气温、最低气温和最高气温与 ET。呈 正相关关系,且均呈显著的上升趋势;同时与 ET。呈 负相关关系的相对湿度显著减小,从而增加了空气 的干燥度、水汽压差增大,且相对湿度的变化率较大 (-0.58%/10a)。因此,造成春季潜在蒸散发量上 升的主要原因是相对湿度的显著减小和气温的显著 升高,尤其与最低气温的显著升高有关(表 4)。夏 季,日照时数与潜在蒸散发 ET。呈正相关关系,且日 照时数以-14.62 h/10a 的速率呈显著的下降趋 势。因此,日照时数的显著减小是夏季潜在蒸散发 减小的主要原因。秋季,虽然平均气温、最高最低气 温与潜在蒸散发 ET。呈正相关关系,但三者均呈上 升趋势。然而,风速和日照时数与潜在蒸散发 ET。 呈正相关关系,且均呈下降趋势,其中日照时数达到 显著性水平,变化率为-18.27 h/10a。因此,日照 时数是影响秋季潜在蒸散发减小的主要因素,其次 是风速。冬季,风速和日照时数与潜在蒸散发 ET。 呈正相关关系,其中风速达到显著性下降趋势。另 外,最低气温与潜在蒸散发 ET。呈负相关关系,且显 著升高。因此,影响冬季潜在蒸散发减小的主要因 素是风速,其次为日照时数。然而,冬季平均气温、 最高最低气温的升高增加了潜在蒸散发量,抵消了 部分蒸散发的下降趋势(图 3),这是冬季潜在蒸散 发呈微弱减小趋势的主要原因。

综上所述,潜在蒸散发的变化是各气象因素共同作用的结果,而且气象因素对蒸散发的影响具有季节差异。桂林市年潜在蒸散发的显著减小主要是由日照时数的减小引起的,其次为风速。Yin Yunhe et al. (2010a)在研究中国区域1960年来的潜在蒸散发变化及因素分析时指出太阳辐射的减小是亚热带和热带湿润地区潜在蒸散发减小的主要因素,与本文研究结果一致。

## 4 讨论

1951~2015年桂林市潜在蒸散发呈显著的减



图 7 广西桂林市 1951~2015 年气象因子的变化趋势(图中灰色虚线代表气象因子的多年平均值) Fig. 7 The annual variability trends of meteorological factors during 1951~2015 in Guilin, Guangxi Province (The gray dotted lines represents the multi-year average values of meteorological factors)

小趋势,变化速率为-8.02 mm/10a。日照时数和 风速是影响潜在蒸散发变化的主要因素。Zhao Yifei et al. (2018)研究了 1960~2013 年西南地区 潜在蒸散发的时空变化规律,结果表明西南地区潜 在蒸散发 ET。以一4.34 mm/10a 的速率显著减小, 且太阳辐射和风速是影响潜在蒸散发减小的主要因

相关系数	降雨量	平均气温	风速	相对湿度	水汽压	日照时数	最高气温	最低气温
年	-0.517**	0.129	0.414**	-0.584**	-0.525**	0.784**	0.489**	-0.187
春季	-0.300*	0.555**	-0.01	-0.658**	0.194	0.767**	0.728**	0.349**
夏季	-0.571**	0.451**	0.24	-0.569**	-0.146	0.833**	0.690**	0.046
秋季	-0.693**	0.510**	0.366**	-0.730**	-0.508**	0.812**	0.718**	0.191
冬季	-0.664**	0.275*	0.470**	-0.836**	-0.640**	0.761**	0.638**	-0.13

注:\*\*代表在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\*代表在 0.05 水平(双侧)上显著相关。图中黑色加粗字体代表气象因子与潜在蒸散发的相关系 数最大。

素,从变化率和影响因素上该结果与本研究是一致的。然而,桂林市潜在蒸散发的减小率明显高于西南地区潜在蒸散发的平均减小速率,这是由于四川、云南、贵州、重庆和广西地区的潜在蒸散发存 在明显的空间差异,表现为从西南到东北方向潜 在蒸散发呈减小趋势。Yin Yunhe et al. (2010a) 研究表明中国区域的潜在蒸散发呈显著的减小趋势,变化率为-8.56 mm/10a。因此,桂林市潜在 蒸散发的变化率非常接近于全国的平均水平。然 而,Wang Zhaoli et al. (2017)报道了中国区域的潜 在蒸散发以-6.84 mm/10a 的速率显著减小(表 6),则表明桂林市蒸散发变化高于该估算结果,这可 能是由于估算潜在蒸散发的年份和所选区域的不同 而致。

目前,对潜在蒸散发估算的结果仍具有很大的 不确定性和时空差异,主要与估算方法、选择站点和 研究时段有关。不同地区潜在蒸散发的突变时间不 同(表 6),但 Zhao Yifei et al. (2018)发现西南地区 潜在蒸散发的突变年份发生在 2003 年,与本研究的 结果一致。Yin Yunhe et al. (2010a)、Fan Junliang et al. (2016)、Wang Zhaoli et al. (2017)和 Zhao Y fei et al. (2018)研究均表明在亚热带季风气候区日 照时数是影响潜在蒸散发变化的主要因素,则更好 的佐证了控制桂林市潜在蒸散发变化的主要因素与 西南季风区一致的结论。而日照时数的显著减小与 云覆盖量、气溶胶浓度的增加和空气污染有关。

表 6 各地区潜在蒸散发变化趋势及影响因素、风速变化率、突变年份对比结果 Table 6 Comparision of the trends of potential evapotranspiration and influence factors, the decline rate of wind speed and abrupt changes for ET<sub>0</sub> in different regions

地区	ET <sub>0</sub> 变化趋势(mm/10a)	风速变化率(m s <sup>-1</sup> /10a)	影响因素	突变年	来源
桂林	-8.02	-0.074	日照时数、风速	1967,2003	本研究
西南地区	-4.34	_	日照时数、风速	2003	Zhao Yifei et al. , 2008
中国	-8.56	-0.09	日照时数	_	Yin Yunhe et al. , 2010a
中国	China:-3.45 SMZ:-1.42	China:-0.08 SMZ:-0.04	SMZ:日照时数	1980s	Fan Junliang et al. , 2016
中国	-6.84	-0.17	风速、日照时数	1982	Wang Zhaoli et al. , 2017

注:表中"一"表示统计值未给出,SMZ 代表亚热带季风气候区(subtropical monsoon zone of China)。

地面风速的减小是影响潜在蒸散发降低的另一 个主要因素(Fan Junliang et al., 2016)。桂林市风 速呈显著的减小趋势,变化率为一0.074 m s<sup>-1</sup>/ 10a。McVicar et al. (2012)在评论近地面风速减小 是否是全球尺度现象时通过 30 多个站点超过 30 年 的观测数据表明全球风速的平均变化趋势是一0.14 m s<sup>-1</sup>/10a。Yin Yunhe et al. (2010a)研究表明中 国区域尺度的风速以一0.09 m s<sup>-1</sup>/10a 的速率显著 减小,而 Fan Junliang et al. (2016)表明中国区域 尺度的平均风速以一0.08 m s<sup>-1</sup>/10a 的速率减小, 亚热带季风气候区的风速减小速率是一0.04 m s<sup>-1</sup>/10a。因此,可以看出全国范围和亚热带季风气 候区的风速均呈显著的减小趋势,目桂林市风速的 减小速率略低于全国平均水平而高于亚热带季风气 候区风速的变化率(表 6)。根据前人研究成果表明 在中国区域范围,风速的显著减小与亚洲季风循环 强度的减弱有关(Fan Junliang et al., 2016; Wang Zhaoli et al., 2017; Fan Zexin et al., 2018),同时 城市化发展、风速计的更新和位置转移对风速的减 小有一定的影响。

## 5 结论

基于 1951~2015 年桂林市日气象数据,采用 Penman-Monterith 方法计算了桂林市潜在蒸散发 量,并结合 Mann-Kendall 趋势检验法和相关性分 析,研究了影响桂林市潜在蒸散发变化的主要因素。 主要得出以下主要结论:

(1)桂林市潜在蒸散发变化具有明显的年、年际 和季节变化特征。1951~2015 年桂林市潜在蒸散 发呈显著的减小趋势,变化速率为-8.02 mm/10a。 夏季潜在蒸散发的显著减小是影响年潜在蒸散发降 低的主要原因。

(2)桂林市潜在蒸散发在 1967 和 2003 年发生突 变。从季节上,潜在蒸散发突变年份存在较大差异。

(3)桂林市年平均气温、最高、最低气温呈显著的上升趋势,而风速、相对湿度和日照时数呈显著的下降趋势,桂林市存在"蒸发悖论"现象。日照时数和风速是影响潜在蒸散发变化的主要因素。桂林市 潜在蒸散发变化是受多种气象因素共同作用的结果,且气象因素对蒸散发的影响具有季节差异。

**致谢:**感谢审稿专家和编辑对本文提出的宝贵 意见和建议!

#### References

- Allen R G, Pereira L S, Rass D, SmithM. 1998. Corp evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Origanization of the United Nation, Rome.
- Breña-Naranjo J A, Laverde-Barajas M Á, Pedrozo-Acuña A. 2017. Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 ~ 2010. International Journal of Climatology, 37(1): 204~213.
- Brutsaert W, Parlange M B. 1998. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. Nature, 396 (6706): 30.
- Burn D H, Hesch N M. 2007. Trends in evaporation for Canadian Prairies. Journal of Hydrology, 336: 61~73.
- Cao Jieping, Chi Daocai, Wu Liqiang, Liu Li, Li Shuaiying, Yu Miao. 2008. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend. Agricultural Science & Technology and Equipment, 5(179): 35~40 (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua, Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian, Xia Riyuan, Zhang Cheng. 2017. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years. Geology in China, 44(5): 874~900 (in Chinese with English abstract).
- Chattopadhyay N, Hulme M. 1997. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. Agricultural and Forest Meteorology, 87: 55  $\sim$ 73.
- Chen Zhongping, Xu Qiang. 2016. Analysis of precipitation characteristics in Jinhua by Mann-Kendal test method. Bulletin of Science and Technology, 32(6): 47~50 (in Chinese with English abstract).
- Cong Zhentao, Ni Guangheng, Yang Dawen, Lei Zhidong. 2008. Evaporation paradox in China. Advances in water Science, 19 (2): 147~152 (in Chinese with English abstract).
- Dadaser-Celik F, Cengiz E, Guzel O. 2016. Trends in reference evapotranspiration in Turkey: 1975 ~ 2006. International Journal of Climatology, 36: 1733~1743.
- De Dios V R, Roy J, Ferrio J P, Alday J G, Landais D, Milcu A, Gessler A. 2015. Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration. Scientific Reports, 5: 10975.
- Dong Qingqing, Zhan Chesheng, Wang Huixiao, Wang Feiyu, Zhu Mingcheng, Niu Cunwen. 2016. Spatio-temporal patterns of actual evapotranspiration in the Weihe River Basin since 2000.

Arid Land Geography, 39(2): 327  $\sim$  333 (in Chinese with English abstract).

- Du Chaoyang, Yu Jingjie, Wang Ping, Zhang Yichi. 2016. Reference evapotranspiration changes: sensitivities to and contributions of meteorological factors in the Heihe River Basin of Northwestern China (1961  $\sim$  2014). Advances in Meteorology,  $1{\sim}17$ .
- Fan Junliang, Wu Lifeng, Zhang Fucang, Xiang Youzhen, Zheng Jing. 2016. Climate change effects on reference crop evapotranspiration acroos different climatic zones of China during 1956~2015. Journal of Hydrology, 542: 923~937.
- Fan Zexin, Thomas A. 2018. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960~2011. Journal of Hydrology, 560: 461~470.
- Fu Guobin, Charles S P, Yu Jingjie. 2009. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. Climatic Change, 97: 193~214.
- Gao Xiaoli, Peng Shizhang, Wang Weiguang, Xu Junzeng, Yang Shihong. 2016. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst area: a case study in Guizhou Province, China. Meteorol Atmos Phys, 128: 677~688.
- Gao Zhendong, He Junshi, Dong Kebao, Li Xiang. 2017. Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. Agricultural and Forest Meteorology, 232: 106~117.
- Huo Zailin, Dai Xiaoqin, Feng Shaoyuan, Kang Shaozhong, Huang Guanhua. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. Journal of Hydrology, 492: 24~34.
- Huntington T G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. Journal of Hydrology, 319:  $83 \sim 95$ .
- Irmak S, Kabenge I, Skaggs K E, Mutiibwa D. 2012. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska-USA. Journal of Hydrology, 420~421; 228~ 244.
- Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, Birks S J, Yi Y, Fawcett P J. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. Nature, 496(7445): 347~350.
- Jhajharia D, Kumar R, Dabral, P P, Singh V P, Choudhary R R, Dinpashoh Y. 2015. Reference evapotranspiration under changing climate over the Thar Desert in India. Meteorological Applications, 22: 425~435.
- Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Imlpacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 132: 1~12.
- Jia Qiuhong, Jing Yuanshu, Jing Zhihao. 2016. Climate change of typical small watershed and its impact on potential evapotranspiration. China Rural Water and Hydropower, 1: 1~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Jung M, Reichstein M C P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J, Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Roupsard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature, 467(7318): 951 ~954.
- Kim S, Shiri J, Singh V P, Kisi O, Landeras G. 2015. Predicting daily pan evaporationby soft computiing models with limited climatic data. Hydrological Sciences Journal, 60 (6): 1120 ~1136.
- Kingston D G, Todd M C, Taylor R G, Thompson J R, Arnell N W. 2009. Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. Geophysical Research Letters, 36(20): 1437~1454.

- Li Cangxiu. 2013. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration in the Pearl, Haihe and Tarim River Basins of China. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Changxiu, Jiang Tong, Wen Shanshan, Wang Yanjun, Qiu Xinfa. 2014. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration and its impact factors in the Pearl River Basin, China. Journal of Tropical Meteorology, 30(3): 483~ 494 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiang, Yang Zhifeng. 2010. Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology, 395: 226 ~234.
- Liu Changming, Zhang Dan. 2011. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. Acta Geographica Sinica, 66(5): 579~588 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changming, Zhang Dan, Liu Xiaomang, Zhao Changsen. 2012. Spatial and temporal change in the potential evapotranspiration sensitivity to meteorological factors in China (1960 ~ 2007). Journal of Geographical Sciences, 22(1): 3~14.
- Liao Xiaofang, Qian Sheng, Peng Yanming, Li Qingguo, Lu Jun, Cai Chunxiang. 2010. Response of evaporation and potential evapotranspiration to the climate variation. Yellow River, 32 (11): 42~45 (in Chinese with English abstract).
- Luo Kaisheng, Tao Fulu, Deng Xiangzheng, Moiwo J P. 2017. Changes in potential evapotranspiration and surface runoff in 1981~2010 and the driving factors in Upper Heihe River Basin in Northwest China. Hydrological processes, 31: 90~103.
- Marshall M, Funk C, Michaelsen J. 2012. Examining evapotranspiration trends in Africa. Clim Dyn, 38: 1849 ~1865.
- McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Li L T, Van N T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: implications for evaporation. Journal of Hydrology, 416~147: 182~205.
- Mo Xingguo, Chen Xuejuan, Hu Shi, Liu Suxia, Xia Jun. 2017. Attributing regional trends of evapotranspiration and gross primary productivity with remote sensing: a case study in the North China Plain. Hydrology and Earth System Sciences, 21: 295~310.
- Nouri M, Bannayan M. 2019. Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses. Theoretical and Applied Climatology, 136: 1073~1084.
- Onyutha C. 2016. Statistical analyses of potential evapotranspiration changes over the period  $1930 \sim 2012$  in the Nile River riparian countries. Agricultural and Forest Meteorology,  $226 \sim 227$ : 80  $\sim 95$ .
- Pan Shufen, Tian Hanqin, Dangal S R S, Yang Qichun, Yang Jia, Lu Chaoqun, Tao Bo, Ren Wei, Ouyang Zhiyun. 2015. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO<sub>2</sub> in the 21st century. Earth's Future, 31(1): 15~35.
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength. Scientific Correspondence, 377: 687~688.
- Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, Shen Zehao, Peng Shushi, Li Junsheng, Zhou Liping, Liu Hongyan, Ma Yuecun, Ding Yihui, FriedlingsteinP, Liu Chunzhen, Tan Kun, Yu Yongqiang, Zhang Tianyi, Fang Jingyun. 2010. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. Nature, 467(7311): 43.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. Science, 298: 1410~1411.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. International Journal of Climatology, 24: 1077~1090.

- Roderick M L, Farquhar G D. 2005. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s. International Journal of Climatology, 25: 2013~2039.
- Schlesinger W H, Jasechko S. 2014. Transpiration in the global water cycle. Agricultural and Forest Meteorology, 189~190: 115~117.
- Tabari H, Marofi S. 2011. Changes of pan evaporation in the West of Iran. Water Resources Management, 25: 97~111.
- Tebakari T, Yoshitani J, Suvanpimol C. 2005. Time-space trend analysis in pan evaporation over Kingdom of Thailand. Journal of Hydrologic Engineering, 10(3): 205~215.
- Wang Yougan, Jiang Tianqi, Bothe O, Fraedrich K. 2007. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin. Theoretical and Applied Climatology, 90: 13~23.
- Wang Kaicun, Dickinson R E. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. Reviews of Geophysics, 50, RG2005.
- Wang Pei, Yamanaka T, Qiu Guoyu. 2012. Causes of decreased reference evapotranspiration and pan evaporation in the Jinghe River catchment, northern China. Environmentalist, 32: 1  $\sim$ 10.
- Wang Bingliang, Li Guosheng. 2014. Quantification of the reasons for reference evapotranspiration changes over the Liaohe Delta, Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 34(10): 1233~ 1238 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liuzhu, Cao Liguo, DengXiaojun, Jia Peihong, Zhang Wei, Xu Xinwanghao, Zhang Kexin, Zhao Yifei, Yan Bingjin, Hu Wei, Chen Yingying. 2014. Changes in aridity index and reference evapotranspiration over the central and eastern Tibetan Plateau in China during 1960~2012. Quaternary International, 349: 280~286.
- Wang Zhaoli, Xie Peiwei, Lai Chengguang, Chen Xiaohong, Wu Xushu, Zeng Zhaoyang, Li Jun. 2017. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and contributing climatic factors in China during 1961 ~ 2013. Journal of Hydrology, 544: 97~108.
- Wen Shanshan, Jiang Tong, Li Xiucang, Wang Tengfei, Wang Yanjun, Fischer T. 2014. Changes of actual evapotranspiration over the Songhua River Basin from 1961 to 2010. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 10(2): 79~86 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yu, Xu Youpeng, Wang Yuefeng, Wu Lei, Li Guang, Song Song. 2017. Spatial and temporal trends of reference crop evapotranspiration and its influential variables in Yangtze River Delta, eastern China. Theor Appl Climatol, 130: 945~958.
- Yin Yunhe, Wu Shaohong, Chen Gang, Dai Erfu. 2010a. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. Theor Appl Climatol, 101: 19~28.
- Yin Yunhe, Wu Shaohong, Dai Erfu. 2010b. Determining factors in potential evapotranspiration Changes over China in the period 1971~2008. Chinese Science Bulletin, 55(29): 3329~3337.
- You Guangyong, Zhang Yiping, Liu Yuhong, Song Qinghai, Lu Zhiyun, Tan Zhenghong, Wu Chuansheng, Xie Youneng. 2013. On the attribution of changingpan evaporation in a nature reserve in SW China. Hydrological Processes, 27: 2676~2682.
- Zhang Kexin, Pan Shaoming, Zhang Wei, Xu Yihong, Cao Liguo. 2015. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012. Quaternary International, 380~381: 75~82.
- Zhao Yifei, Zou Xinqing, Zhang Jianxiang, Cao Liguo, Xu Xinwanghao, Zhang Kexin, Chen Yingying. 2014. Spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961~2012. Quaternary International, 349: 196~206.
- Zhao Yifei, Zou Xinqing, Cao Liguo, Yao Yulong, Fu Guanghe. 2018. Spatiotemporal variations of potential evapotranspiration and aridity index in relation to influencing factors over

Southwest China during 1960  $\sim$  2013. Theor Appl Climatol, 133: 711 $\sim$ 726.

Zuo Depeng, Xu Zongxue, Yang Hong, Liu Xingcai. 2012. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China. Hydrological Processes, 26: 1149~1160.

#### 参考文献

- 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 雷志栋. 2008. "蒸发悖论"在中国的规律 分析. 水科学进展, 19(2): 147~152.
- 曹洁萍,迟道才,武立强,刘丽,李帅莹,于淼. 2008. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究.农业科技与装备,5 (179):35~40.
- 陈中平,徐强. 2016. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征. 科技通报, 32(6): 47~50.
- 曹建华,蒋忠诚,袁道先,夏日元,章程. 2017. 岩溶动力系统与全球 变化研究进展. 中国地质,44(5):874~900.

董晴晴,占车生,王会肖,王飞宇,朱明承,牛存稳. 2016. 2000 年以

来的渭河流域实际蒸散发时空格局分析.干旱区地理,39(2): 327~333.

- 贾秋洪,景元书,景梽淏. 2016. 典型小流域气候变化及其对潜在蒸 散量的影响,中国农村水利水电,1:1~11.
- 廖晓芳,钱胜,彭彦铭,李庆国,鲁俊,蔡春祥. 2010. 蒸发皿蒸发和 潜在蒸散发对气候变化的响应.人民黄河,32(11),42~45.
- 刘昌明,张丹. 2011. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征 分析. 地理学报,66(5):579~588.
- 李修仓. 2013. 中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究. 南京:南 京信息工程大学.
- 李修仓,姜形,温珊珊,王艳君,邱新法.2014.珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析.热带气象学报,30(3):483~494.
- 温珊珊,姜形,李修仓,王腾飞,王艳君,Fischer T. 2014. 1961-2010 年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要求分析.气候变化 研究进展,10(2):79~86.
- 王炳亮,李国胜. 2014. 1961~2010 年辽河三角洲参考蒸散发变化 特征及主导因子分析. 地理科学, 34(10): 1233~1238.

## The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for a typical karst area

GUO Xiaojiao<sup>1)</sup>, GONG Xiaoping<sup>3)</sup>, SHI Jiansheng<sup>\*1)</sup>, GUO Jiao<sup>1)</sup>, YUAN Daoxian<sup>2)</sup>, LIN Yushi<sup>2)</sup>

1) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, 050061;

 Key Laboratory of karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004;

3) Huiyang District Natural Resources Bureau in Huizhou Lity, Guangdong Province, Huiyang, Guangzhou, 516200 \* Corresponding author: tiger7886@263.net

#### Abstract

Evapotranspiration is the key link between the atmospheric process and terrestrial hydrological process, which plays an important role in water cycle processes and water balance on the regional/basin scales. In karst area, suface ecological environment is fragile and sensitive to climate change. Evapotranspiration may be the key eco-hydrological process associated with atmospheric, water, energy exchange and carbon cycle. Therefore, accurate estimation of evapotranspiration plays an important role in better understand of the karst water cycle in response to climate change, carbon cycle and ecological restoration. In this study, the potential evapotranspiration  $ET_0$  in Guilin city was calculated by using the Penman-Monterith method based on the daily meteorological data from Guilin meteorological station during the period from 1951 to 2015. The Mann-Kendall test and correlation analysis were used to determine the trend of potential evapotranspiration and its influencing factors in Guilin city. Results show that potential evapotranspiration in Guilin has a significant annual, interannual and seasonal changes. The  $ET_0$  in Guilin from 1951 to 2015 had a significant decreasing trend with a rate of -8.02 mm/10a on the annual scale. Decreasing trends were observed in summer, autumn and winter, while a slightly increaseing trend was observed in spring. Significant annual decreasing trend of ET<sub>0</sub> in Guilin could be concluded as mostly affected by the decline of summer  $ET_0$ . Abrupt changes for  $ET_0$  series were detected in 1967 and 2003. The results of Mann-Kendall trend test and correlation analysis show that average, maximum and minimum air temperatures have increased significantly over the past 65 years, whilst wind speed, relative humidity and sunshine duration exhibited significant decreasing trends. Sunshine duration was the major factor dominating variability of  $ET_0$  in Guilin from 1951 to 2015, followed by wind speed.

Key words: Potential evapotranspiration; Penman-Monteith; trend; sunshine duration; climate change